

论 著 · 胸部

基于人工智能触发技术实现主动脉CTA图像质量均一化的可行性研究*

齐珂 原典 张怡存
张梦圆 张炜斑 吕培杰
高剑波 刘杰*

郑州大学第一附属医院放射科
(河南 郑州 450052)

【摘要】目的 探讨基于人工触发技术实现主动脉CT血管成像(CTA)图像质量均一化的可行性。方法 前瞻性纳入行主动脉CTA检查的120例患者随机分为两组，每组60例。常规组采用传统团注追踪技术固定6秒触发后延迟，实验组采用人工智能触发技术提供的个性化触发后延迟。比较两组血管CT值、CNR、血管增强水平、增强均匀性以及主观图像质量的差异。结果 个性化触发后延迟时间平均值为11.2±1.5秒，范围从7.8秒到14.1秒。实验组主动脉平均CT值高于常规组(418.21±70.42 HU vs. 344.73±62.56 HU, P<0.001)。与常规组相比，实验组的血管增强水平、增强均匀性、主观评分(78.3% vs. 36.7%, 93.3% vs. 63.3%, 4.69±0.55 vs. 3.81±1.00, 均P<0.001)均有明显改善，具有统计学差异。结论 基于人工智能触发技术可获得准确的扫描触发时机，优化血管增强水平和增强均匀性，实现主动脉CT血管成像图像质量的均一化。

【关键词】人工智能；体层摄影术；
主动脉；图像质量；团注追踪技术
【中图分类号】R445.3；R543.1
【文献标识码】A
【基金项目】河南省卫生健康委员会科技
攻关项目(212102310142)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.10.021

Feasibility Study of Achieving Consistent Image Quality in CT Angiography of the Aorta with the Artificial Intelligence Triggered Technique*

QI Ke, YUAN Dian, ZHANG Yi-cun, ZHANG Meng-yuan, ZHANG Wei-ting, LV Pei-jie, GAO Jian-bo, LIU Jie*.
Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, Henan Province, China

ABSTRACT
Objective To assess the feasibility of achieving consistent image quality in aortic computed tomography angiography (CTA) with the artificial intelligence triggered techniques, comparing the image quality with aortic CTA using traditional bolus tracking technique. **Methods** Participants undergoing aortic CTA were prospectively assigned to two different groups, the control group with a fixed 6-second post-trigger delay using traditional bolus tracking technique and the experimental group with a personalized post-trigger delay using artificial intelligence trigger technique. CT attenuation of the pulmonary trunk, ascending aorta, descending aorta, abdominal aorta, branches of the abdominal aorta and right common iliac artery were measured in both groups. Subsequently, the enhancement level and contrast homogeneity of the aorta were evaluated. Two radiologists assessed the subjective image quality. The student's t-test was used to compare CT attenuation and contrast-to-noise ratio (CNR), while the chi-square test was used to compare enhancement level, contrast homogeneity. The Wilcoxon-Mann-Whitney test was used to compare subjective image quality scores, with consistency analysis conducted using the Cohen's kappa. **Results** The control group with a fixed 6-second delay, while the experimental group with the personalized post-trigger delay range from 7.8s to 14.1s (mean, 11.2 ± 1.5 s). Higher mean attenuation was observed in the experimental group compared to the control group (418.21±70.42 HU vs. 344.73±62.56 HU, t=6.04, P<0.001). Enhancement level (78.3% vs. 36.7%, P<0.001), contrast homogeneity (93.3% vs. 63.3%, P<0.001), and subjective ratings (4.69±0.55 vs. 3.81±1.00, P<0.001) were superior in the experimental group. **Conclusion** Using a personalized post-trigger delay from the artificial intelligence trigger technique, consistent image quality can be achieved in aortic CTA based on the improved enhancement level and contrast homogeneity due to reliable scan timing.
Keywords: Artificial Intelligence; Tomography; Aorta; Image Quality ; Bolus Tracking Technique

主动脉计算机断层扫描血管成像(computed tomography angiography, CTA)作为一种对主动脉及其主要血管分支进行成像的无创方式广泛应用于临床工作中，是主动脉疾病诊断的首选检查方法^[1]。为最大限度地提高血管和周围组织的图像对比度，确保CTA图像质量，需在对比剂通过的动脉期采集数据。因此，确定最佳扫描时机对于提高目标血管的增强水平和增强均匀性至关重要^[2]。目前常用的方法是团注追踪技术，即在血管层面连续监测CT值，当CT值达到触发阈值后经过固定的触发后延迟开始图像采集，从而优化扫描时机。但这种固定的触发后延迟时间是基于人群的平均值，可能并不适用于血液循环障碍的患者，因此需要考虑患者个体因素。既往的研究提出了根据不同的适应证给予患者相应的触发后延迟时间^[3-4]，此外一些研究者根据双感兴趣区或监测股动脉的小剂量测试结果计算出扫描时机^[5-6]；然而这很大程度上依赖于操作者的经验或使工作流程复杂化。为解决上述问题，本研究采用一种新的团注追踪技术即人工智能触发技术，该技术利用对比剂注射信息和患者特异性动脉脉冲响应函数通过卷积算法建立动态模型，进而推导出个性化触发后延迟时间^[7]。本研究的目的是通过比较在相同对比剂注射方案下固定触发后延迟时间和个性化触发后延迟时间对主动脉CTA图像质量的影响，探讨基于人工智能触发技术精准实现主动脉CTA图像质量均一化的可行性。

1 资料与方法

1.1 一般资料 研究遵循的程序符合伦理学标准，获得了伦理委员会的批准文件以及受试者签署的知情同意书。前瞻性纳入2023年5月至2024年2月于郑州大学第一附属医院行主动脉CTA检查的患者。120例患者纳入研究，常规组60例，实验组60例。记录所有患者的年龄、性别、身高、体重等一般资料。
纳入标准：签署CTA检查知情同意书，临床申请行主动脉CTA检查且疑似主动脉疾病或随访的患者。排除标准：(1)年龄<18岁；(2)有碘对比剂过敏或相关过敏史；(3)慢性肾病(肾小球滤过率小于30 mL/min/1.73m²)；(4)怀孕或哺乳期女性；(5)肾下主动脉闭塞；(6)采用人工智能触发技术监测点少于4个或启用失败。
1.2 方法 所有患者均采用西门子第三代双源CT (Somatom Definition Force, Siemens)进行扫描，扫描范围从肺尖到耻骨联合下。管电压90 kVp；螺距1.2；准直器宽度

【第一作者】齐珂，女，硕士研究生，主要研究方向：CT成像。E-mail: qk_kkkkkkk@163.com
【通讯作者】刘杰，男，主任技师，主要研究方向：CT成像。E-mail: liujieict@163.com

0.6×192 mm; 球管旋转时间0.5 s/r; 自动管电流(CareDose4D; ref:244 mAs)。所有图像均采用高级迭代重建(ADMIRE; Strength=3), 卷积核为Bv40, 重建层厚1.0 mm, 层间距为1.0 mm, 重建视野(field of view, FOV)自适应每个患者。

两组的对比剂注射方案一致: 采用双筒高压注射器, 通过右肘前静脉以5 mL/s注射18 mL 0.9% 生理盐水, 以确保对比剂流动顺畅。随后, 以3 mL/s依次注入 60 mL(350 mgI/mL, 欧乃派克)的对比剂和50 mL生理盐水。

1.3 人工智能触发技术与传统团注追踪技术 监测层面位于左心房水平处的降主动脉, 触发阈值为100 HU。常规组采用传统团注追踪触发技术, 达到阈值后经过固定6秒延迟开始图像采集。实验组采用新兴的人工智能触发软件(Custom Pack, SW VA50 CP2, Siemens) 获得个性化触发后延迟时间。人工智能触发技术通过

分析监测层面的CT值来预测患者的局部血管增强随时间变化的曲线, 该预测函数是利用注射方案和患者特异性动脉脉冲响应函数通过卷积算法建立的动态模型。

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} IP(\tau) \cdot AIF(t-\tau) d\tau = IP(t) \otimes AIF(t)$$

具体如下: 注射方案包括静脉注射对比剂的碘浓度、总注射量和注射速度。患者特异性动脉脉冲响应函数是利用最小二乘法将监测扫描期间获得的至少四个CT值与增强曲线数据库中的人群平均参数化动脉血液循环曲线进行拟合得出。考虑扫描范围和螺距等参数的影响, 将扫描中间时间放置在预测峰值处, 最后一次监测扫描与预测峰值时间(t_{tp})之间的持续时间作为理想的触发后延迟时间(图1)。

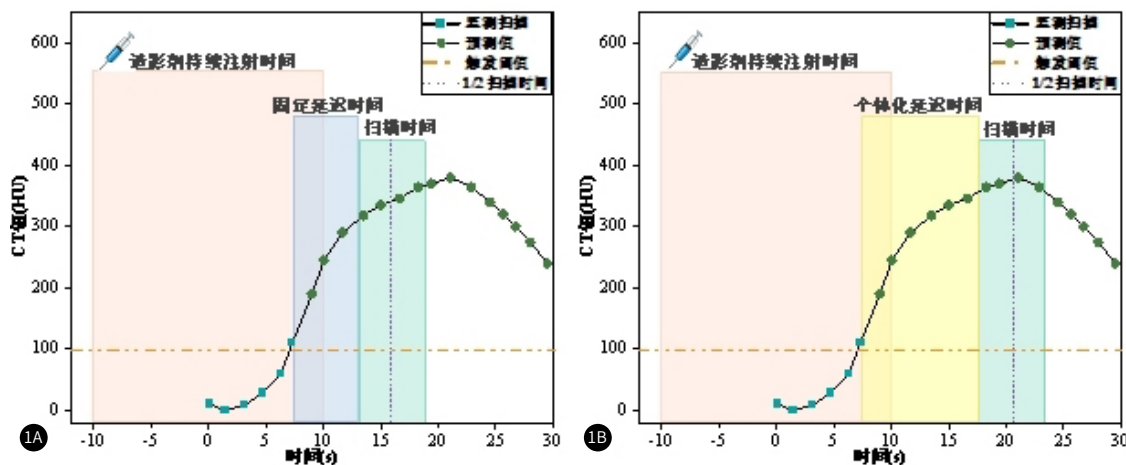


图1 主动脉CTA中固定触发后延迟(1A)和人工智能触发后延迟(1B)示意图。对比剂注射10秒后启动监测扫描, 在达到监测阈值后触发延迟, 对比剂持续注射时间20s。患者特异性触发延迟的算法考虑扫描参数、患者自身动脉脉冲响应等影响因素预测CT值随时间变化的曲线, 并将扫描中间时间放置在预测增强峰值处, 从而给出患者特异性触发后延迟时间(1B)。

1.4 图像质量

1.4.1 客观评价 测量肺动脉、肺动脉干水平的升主动脉和降主动脉、右肾动脉水平的腹主动脉, 右侧髂总动脉以及腹主动脉的主要分支(腹腔干、肠系膜上动脉、左肾动脉、右肾动脉和肠系膜下动脉)血管CT值。将右肾下极水平腰大肌的CT值作为背景噪声(HU_{肌肉}), 取其像素平均值的标准差(SD_{肌肉})为图像噪声。根据血管内径绘制尽可能大的ROI, 同时注意避开血管壁、主动脉支架、钙化斑块、血栓和伪影显著的区域。腰大肌的ROI要避开肌肉内的脂肪条纹和血管。对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)计算公式如下:

$$CNR = \frac{HU_{血管} - HU_{肌肉}}{SD_{肌肉}}$$

1.4.2 血管增强水平与增强均匀性 血管增强水平: 低: 降主动脉、腹主动脉和右侧髂总动脉中至少有一个CT值低于350 HU; 最佳: 上述三个ROI的CT值均在350至600 HU之间; 高: 上述三个ROI中至少有一个CT值高于600 HU^[8-9]。此外,

血管增强均匀性: 一般: 升主动脉与右侧髂总动脉CT值差值的绝对值>80 HU; 优秀: 升主动脉与右侧髂总动脉CT值差值的绝对值<80 HU^[8,10]。

1.4.3 主观评价 两名分别拥有11年和13年工作经验的放射科医生在对临床指征、实验分组和实验方案均为盲法的情况下对主观图像质量进行评估, 并在正式评估之前对本研究外的五名随机患者的主动脉CTA图像进行评定以达成评分标准的共识。总体图像质量评分应用Likert 5 分法, 具体标准如下——5分: 主动脉边界光滑, 管腔对比度和增强均匀性极好, 分支血管显影极佳; 4分: 主动脉边界光滑, 管腔对比度和增强均匀性良好, 分支血管显影良

好; 3分: 主动脉边界欠清, 管腔对比度和增强均匀性尚可, 分支血管显影一般, 尚可满足诊断; 2分: 主动脉边界毛躁, 管腔对比度和增强均匀性差, 分支血管显影不良; 1分: 主动脉边界毛躁, 管腔对比度极差, 不具有增强均匀性, 存在分支血管不显影。

1.5 辐射剂量 记录常规组和实验组的容积CT剂量指数 (CTDI_{vol}) 和剂量长度乘积 (dose length product, DLP)。取胸部转换系数(0.014 mSv/mGy·cm)和腹部转换系数(0.015 mSv/mGy·cm)的平均值作为计算主动脉扫描有效剂量(Effective dose, ED)的转换系数, ED的计算公式如下:

$$ED = DLP \times 0.0145$$

1.6 统计方法 所有分析均使用SPSS软件(IBM, version 26.0; Armonk, NY)进行。定量资料以表示, 分类变量以频数和百分比表示。符合正态分布的数据的比较采用独立样本 t 检验, 分类变量的比较采用卡方检验, 等级变量的比较采用Wilcoxon-Mann-Whitney检验。两组血管CT值和CNR的比较采用独立样本t检验, 增强水平、增强均匀性的比较采用卡方检验, 主观评分的比较采用Wilcoxon-Mann-Whitney检验。采用Kappa检验对主观评分的一致性进行检验。P值小于 0.05 表示差异具有统计学意义。0.6 Kappa值0.8: 一致性较好; Kappa 值0.8: 一致性极好。

2 结果

2.1 患者的一般资料及辐射剂量 两组研究对象的一般资料及辐射剂量见表1。共纳入120患者例, 其中常规组男47例, 女13例, 平均年龄(58±11)岁, 平均BMI(25.44±4.26)kg/m², 未经治疗的主动脉夹层5例, 未经治疗的主动脉瘤11例; 实验组男44例, 女16例, 平均年龄(59±13)岁, 平均BMI(24.71±3.09)kg/m², 未经治

疗的主动脉夹层3例，未经治疗的主动脉瘤11例。两组患者在年龄($P=0.570$)、性别($P=0.522$)、身高($P=0.511$)、体重($P=0.255$)、BMI($P=0.289$)、适应症($P=0.852$)、CTDI_{vol}($P=0.808$)、DLP($P=0.714$)和ED($P=0.714$)均无统计学差异。

表1 常规组与实验组患者的一般资料及辐射剂量

变量	常规组 (n=60)	实验组 (n=60)	统计值	P值
年龄(岁)	58±11	59±13	0.57 ^a	0.570
性别			0.41 ^b	0.522
男	47(78)	44(73)		
女	13(22)	16(27)		
身高(cm)	169.47±7.09	168.62±7.02	-0.66 ^a	0.511
体重(kg)	73.25±13.82	70.59±11.57	-1.14 ^a	0.255
BMI(kg/cm ²)	25.44±4.26	24.71±3.09	-1.06 ^a	0.289
适应症			0.577 ^b	0.852
随访	44	46		
未经治疗的主动脉夹层	5	3		
未经治疗的主动脉瘤	11	11		
管电压(kVp)	90	90		
管电流(mAs)	211.18±69.70	210.77±44.81	-0.04 ^a	0.969
延迟时间(s)	6	11.2±1.5	26.56 ^a	<0.001
CTDI _{vol} (mGy)	5.89±1.73	5.96±1.09	0.24 ^a	0.808
DLP(mGy·cm)	440.33±145.01	432.24±89.16	-0.37 ^a	0.714
ED(mSv)	6.38±2.10	6.27±1.29	-0.37 ^a	0.714

注：^a：t值；^b： χ^2 值；BMI：体重指数；CTDI_{vol}：容积CT剂量指数；DLP：剂量长度乘积；ED：有效辐射剂量。正态分布数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，分类变量以频数和百分比表示。

2.2 触发后延迟时间 常规组为固定的6秒触发后延迟时间，实验组基于人工智能触发技术给出的个性化触发后延迟时间的范围从7.8秒到14.1秒($11.2 \pm 1.5s$, $P<0.001$)，具有统计学差异。

2.3 图像质量

2.3.1 客观图像质量 表2实验组动脉血管的平均CT值、CNR均高于与常规组，尤其是在右髂总动脉，差异具有统计学意义(均有 $P<0.05$)。此外，实验组升主动脉与髂总动脉CT值差值的绝对值小于常规组(29.53 ± 35.24 HU vs. 73.57 ± 77.11 HU, $t = -4.023$; $P<0.001$)。

2.3.2 血管增强水平与增强均匀性 实验组的最佳增强水平与常规组相比，有统计学差异(78.3% vs. 36.7% ; $P<0.001$)，而常规组的低增强水平所占的比例更高(61.7%)。在血管增强均匀性方面，实验组中主动脉均匀增强的比例也要高得多(93.3% vs. 63.3% ; $P<0.001$)，而常规组因扫描时机过早而导致血管增强不均匀的比例为 38.3% (表3)。两组图像示例见图2。

表2 常规组与实验组不同位置的血管CT值、CNR

	常规组	实验组	t值	P值
肺动脉干(HU)	383.42±132.51	188.97±78.30	-9.79	<0.001
CNR	15.16±6.39	6.33±3.43	-9.43	<0.001
主动脉全程(HU)	344.73±62.56	418.21±70.42	6.04	<0.001
CNR	13.46±3.88	17.20±4.43	4.92	<0.001
升主动脉	379.53±73.68	416.92±78.44	2.69	0.008
CNR	13.46±3.88	17.20±4.43	4.92	<0.001
降主动脉(HU)	349.47±71.89	421.20±69.69	5.55	<0.001
CNR	13.73±4.40	17.33±4.42	4.48	<0.001
腹主动脉(HU)	340.77±75.68	413.78±69.72	5.50	<0.001
CNR	13.73±4.40	17.33±4.42	4.48	<0.001
右髂总动脉(HU)	309.13±66.73	420.95±73.89	8.70	<0.001
CNR	11.75±3.40	17.34±4.64	7.53	<0.001
腹腔干(HU)	334.50±68.38	403.90±67.07	5.61	<0.001
CNR	11.75±3.40	17.34±4.64	7.53	<0.001
肠系膜上动脉(HU)	335.97±69.22	409.93±70.11	5.82	<0.001
CNR	11.75±3.40	17.34±4.64	7.53	<0.001
左肾动脉(HU)	323.00±66.93	393.58±65.15	5.85	<0.001
CNR	11.75±3.40	17.34±4.64	7.53	<0.001
右肾动脉(HU)	324.63±68.76	392.97±65.16	5.59	<0.001
CNR	11.75±3.40	17.34±4.64	7.53	<0.001
肠系膜下动脉(HU)	291.87±91.42	384.40±66.90	6.33	<0.001
CNR	11.03±4.79	15.65±4.41	5.50	<0.001

表3 常规组与实验组血管增强水平与增强均匀性

组别		常规组(n=60)	实验组(n=60)	χ^2 值	P值
增强水平	低	37(61.7%)	11(18.3%)	23.48	<0.001
	最佳	22(36.7%)	47(78.3%)		
	高	1(1.7%)	2(3.3%)		
增强均匀性	一般	22(36.7%)	4(6.7%)	15.91	<0.001
	优秀	38(63.3%)	56(93.3%)		



图2 2A: 男性，76岁，BMI=23.88 kg/cm²，患有未经治疗的腹主动脉瘤，采用传统团注追踪技术进行主动脉CTA检查，获得的MIP(左)和VR(右)图像。传统团注追踪技术下的固定触发后延迟时间为6s，从主动脉到髂动脉的CT值出现显著降低，腹主动脉的强化未能满足诊断需要，两位医师均判定为1分。升主动脉、降主动脉、腹主动脉和髂总动脉的CT值分别为468 HU、391 HU、320 HU和190 HU。
2B: 男性，77岁，BMI=24.80 kg/cm²，患有未经治疗的腹主动脉瘤，采用人工智能触发技术进行主动脉CTA检查，获得的MIP(左)和VR(右)图像。人工智能触发技术自动推导出的个性化触发后延迟时间为12s，从主动脉到髂动脉显示出均匀且高水平的血管增强，腹主动脉瘤显影佳，两位医师均判定为5分。升主动脉、降主动脉、腹主动脉和髂总动脉的CT值分别为400 HU、434 HU、455 HU和427 HU。

2.3.3 主观图像质量 表4为两组图像的主观评分结果。两位医师之间评分的一致性极好, Kappa值为0.865(95% CI: 0.797~0.933), 将两名读者的平均分数用于统计分析的结果。两组图像主观评分存在差异, 实验组的总体图像质量更好, 差异具有统计学意义(4.69±0.55 vs. 3.81±1.00, P<0.001)。

表4 常规组与实验组主动脉CTA图像主观评分结果

组别	常规组	实验组	Z值	P值
医师1	3.75±1.02	4.67±0.60	-5.603	<0.001
医师2	3.87±1.02	4.72±0.56	-5.506	<0.001
平均	3.81±1.00	4.69±0.55	-5.601	<0.001

3 讨 论

主动脉CTA作为一种对主动脉及其主要血管分支进行成像的无创方式广泛应用于临床中, 可以准确评估主动脉夹层以指导其分类和临床手术方案的制定, 是主动脉瘤定性和放置支架的首选检查方式^[11-12]。Korporaal等^[7]提出了一种基于团注追踪的算法, 用于预测患者特定峰值增强时间。Yuan D^[10,13-14]等报道了采用基于该算法的人工智能触发技术在血管CTA、腹部实质脏器增强的可行性研究。本研究将该技术应用于主动脉血管成像, 探讨基于人工智能触发技术实现主动脉CTA图像质量均一化的可行性。

主动脉病变解剖功能的“一站式”评估需要高质量的CTA图像, 而CTA图像质量很大程度上取决于血管增强情况, 受对比剂注射方案、采集参数和患者因素等多种因素的影响^[15-16]。鉴于高端CT扫描速度较快, 通常对比剂量会进一步减少, 在CT血管造影中错过峰值动脉增强的风险增加。因此优化扫描触发时机是关键。目前常用的扫描延迟技术是团注追踪技术和小剂量测试技术。从实际应用的角度来看, 团注追踪技术因单次注射对比剂、优化工作流程和提高时间效率而被广泛应用^[17]。然而, 固定的触发后延迟时间是基于人群的平均值, 并不适用于血液循环特征不同的所有患者。与低心输出量患者相比, 高心输出量患者的动脉增强较低, 达峰时间延迟^[18-19], 采用常规固定的触发后延迟时间扫描开始可能过早, 图像采集时间早于对比剂到达目标血管的时间, 导致远端以及分支动脉欠增强^[20]。考虑到主动脉CTA扫描范围较长, 这一现象更为常见。因此需要考虑影响动脉增强的基本生理参数在个体间的变化。本研究发现, 实验组个性化触发后延迟时间的范围在7.8秒至14.1秒之间, 这表明时间密度曲线在患者之间存在很大的差异, 在主动脉CTA中触发后延迟时间的选择需要考虑患者个体因素。结果显示, 患者的基本信息和适应症无统计学差异, 在相同的注射方案下, 实验组主动脉主干和腹主动脉分支血管CT值、CNR明显高于常规组, 增强均匀性显著提高, 主观图像质量更好。这表明采用人工智能触发技术充分利用患者的心血管状态监测信息, 能够提供更准确的扫描触发时机, 产生一致、均匀的血管增强。触发后延迟时间的个性化对于同步图像采集和对比剂注射具有重要的临床意义, 有助于实现主动脉CTA成像图像质量均一化。此外, 图像质量的优化提示了进一步降低对比剂用量的潜力。

以往的研究探索了不同的方面来提高主动脉CTA的图像质量, 例如Obman M.M.等^[21]采用多相对比剂方案获得的主动脉CTA图像与单次推注方案相比增强水平更高, 对比均匀性优异; 刘杰等^[22]发现非线性融合技术的应用有助于提高主动脉CTA图像质量。但并未考虑到不同患者心功能的差异以及方案或后处理的复杂性, 其临床应用受到限制。而人工智能触发技术将患者的实时监测数据拟合到人群平均参数化动脉增强曲线数据库, 导出患者的特定动脉脉冲响应。同时考虑对比剂注射信息, 采用卷积算法建立预测模型, 可自动推导出个性化的最佳触发后延迟时间。该技术的应用不仅能够满足人们的个性化医疗需求, 还可集成到扫描协议中进而推动CTA影像检查全流程的智能化发展。

本研究存在一些局限性。第一, 样本量有限, 仍需大样本量的研究。第二, 管电压和对比剂注射方案是固定的, 没有根据患

者体重进行调整。不过, 采取这些措施是为了凸显个性化触发后延迟时间在不同个体的作用。第三, 该实验研究的是胸腹主动脉的广泛区域, 而不是特定的疾病。对于各种疾病(如肝血管瘤)是否需要不同的触发后延迟时间, 有待于今后进一步探讨。

综上所述, 基于人工智能触发技术能够优化扫描触发时机, 改善主动脉CTA检查中血管的增强水平和增强均匀性, 从而实现主动脉CTA图像质量均一化。与传统的团注追踪技术相比, 人工智能触发技术更具优势。

参考文献

[1] 陆东旭, 瑞王, 范占明, 等. 双低剂量全主动脉CT血管成像临床应用研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2015, 13(4): 117-120.

[2] Kyongtae T, Bae M P. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches 1[J]. Radiology, 2010, 256(1): 32-61.

[3] Lehmkuhl L, Andres C, Lücke C, et al. Dynamic CT angiography after abdominal aortic endovascular aneurysm repair: influence of enhancement patterns and optimal bolus timing on endoleak detection[J]. Radiology, 2013, 3(268): 890-899.

[4] Schneider J G, Wang Z J, Wang W, et al. Patient-tailored scan delay for multiphase liver CT: improved scan quality and lesion conspicuity with a novel timing bolus method[J]. AJR Am J Roentgenol, 2014, 202(2): 318-323.

[5] Hoshino T, Ichikawa K, Hara T, et al. Optimization of scan timing for aortic computed tomographic angiography using the test bolus injection technique[J]. Acta Radiologica, 2016, 57(7): 829-836.

[6] Tomizawa N, Ito S, Nakao T, et al. Aortic CT angiography using the double region of interest timing bolus technique: feasibility of 80 kVp scanning in lean patients[J]. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2019, 35(11): 2113-2121.

[7] Korporaal J G, Bischoff B, Arnoldi E, et al. Evaluation of a new bolus tracking-based algorithm for predicting a patient-specific time of arterial peak enhancement in computed tomography angiography[J]. Invest Radiol, 2015, 50(8): 531-538.

[8] Chen P A, Huang E P, Chen K T, et al. Comparison of four contrast medium delivery protocols in low-iodine and low-radiation dose CT angiography of the aorta[J]. Clinical Radiology, 2020, 75(10): 797-799.

[9] Kai Higashigaito M, Tabea Schmid M, Gilbert Puippe M E, et al. CT angiography of the aorta: prospective evaluation of individualized low-volume contrast media protocols 1[J]. Radiology, 2016, 280(3): 960-968.

[10] Hinzpeter R, Eberhard M, Gutjahr R, et al. CT Angiography of the aorta: contrast timing by using a fixed versus a patient-specific trigger delay[J]. Radiology, 2019, 291(2): 531-538.

[11] 高伟, 任伟超, 马宁, 等. 多层螺旋CT重建诊断主动脉夹层的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(5): 160-162.

[12] 杨娟, 王晓慧, 师芳芳, 等. 腹部CT血管造影对主动脉夹层的诊断价值研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(12): 154-156.

[13] Yuan D, Wang Y, Lin S, et al. Patient-specific post-trigger delay in coronary CT angiography: a prospective study comparing with fixed delay[J]. European Journal of Radiology, 2023, 163: 110813.

[14] Yu J, Lin S, Lu H, et al. Optimize scan timing in abdominal multiphase CT: bolus tracking with an individualized post-trigger delay[J]. European Journal of Radiology, 2022, 148: 110139.

[15] 孔海涛, 郭子祺, 刘婷婷. 人工智能技术结合低剂量方案在胸部CT成像中的应用研究探讨[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(12): 75-76.

[16] 周慧, 龚波, 沈丹丹. 主动脉壁血肿的CT诊断[J]. 罕少疾病杂志, 2020, 27(3): 66-68.

[17] 阎晓婧, 郭洁, 卫淑芳, 等. 不同碘流率对肾动脉CTA图像最佳触发阈值的影响[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33(7): 1076-1079.

[18] Sakai S, Yabuuchi H, Chishaki A, et al. Effect of cardiac function on aortic peak time and peak enhancement during coronary CT angiography[J]. European Journal of Radiology, 2010, 75(2): 173-177.

[19] Kyongtae T, Bae M P, Jay P, Heiken M, James A, Brink M. Aortic and hepatic contrast medium enhancement at ct part ii. effect of reduced cardiac output in a porcine model[J]. Radiology, 1998, 3(207): 657-662.

[20] Gutjahr R, Fletcher J G, Lee Y S, et al. Individualized delay for abdominal computed tomography angiography bolus-tracking based on sequential monitoring: increased aortic contrast permits decreased injection rate and lower iodine dose[J]. Journal of Computer Assisted Tomography, 2019, 43(4): 612-618.

[21] Obmann M M, Gehweiler J, Schindera S T, et al. Clinical evaluation of a novel multibolus contrast agent injection protocol for thoraco-abdominal CT angiography: assessment of homogeneity of arterial contrast enhancement[J]. European Journal of Radiology, 2020, 126: 108957.

[22] 刘杰, 高剑波, 张永高, 等. 双源CT非线性融合技术联合低流率注射对比剂行主动脉成像的可行性[J]. 中华放射学杂志, 2014(6): 505-506.